DOI:10.11931/guihaia.gxzw202002011

蒋家沟流域不同海拔灌草层群落特征与土壤关系的研究

贺静雯[1,2,3]，刘 颖[1,2,3]，李松阳[1,2,3]，余 杭[1,2,3]，吴建召[1,2,3]，崔 羽[1,2,3]，
林勇明[1,2,3*]，王道杰[4]，李 键[1,2]
（1．福建农林大学 林学院，福州 350002；2．福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室， 福州 350002；3．中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室，成都 610041；
4．中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所，成都 610041）

摘 要：为了解干热河谷区不同海拔梯度植物群落灌草层物种多样性与土壤养分、水分之间的关系，选择干热河谷典型流域——蒋家沟流域为研究区域。在流域内海拔 1 400~3 000 m 范围设置样带，并对样带内 8 个海拔梯度的植物群落进行样方调查。统计不同海拔梯度灌草层的物种组成，测定土壤养分、土壤含水量和持水量，并将土壤指标与植被多样性指数进行主成分分析和皮尔逊相关性分析。结果表明：流域内样地共发现灌草层植物 32 科 77 属 80 种，且灌草层植物群落组成、土壤有机碳（SOC）含量、全磷（TP）含量、土壤含水量和持水量均受海拔梯度的显著影响（$P<0.05$）。其中，土壤含水量、持水量、植物群落的丰富度指数和多样性指数均随着海拔升高不断增加，且高海拔区域 SOC 含量显著高于中低海拔区域（$P<0.05$）。土壤 TP 含量与 Pielou 指数，土壤含水量与 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数和物种数均呈显著正相关（$P<0.05$），说明除海拔梯度外，土壤养分、水分含量也是影响植物群落灌草层组成和多样性的关键因子。

关键词：蒋家沟，群落特征，物种多样性，土壤全养分，土壤水分
中图分类号：Q948　　　　**文献标识码**：A

Relationship between shrub plant communities and soil at different altitudes in Jiangjiagou watershed

HE Jingwen[1, 2,3], LIU Ying[1, 2,3], LI Songyang[1,2,3], YU Hang[1, 2,3], WU Jianzhao[1, 2,3], CUI Yu[1,2,3], LIN Yongming[1, 2,3*], WANG Daojie[4], LI Jian[1, 2]
(1. *College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University*, Fuzhou 350002, China; 2. *Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province*, Fuzhou 350002, China; 3. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences*, Chengdu 610041, China; 4. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences*, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to explore the relationship between the species diversity of shrub-grass layers and soil nutrients and water content in plant communities at different elevation gradients in the

---

基金项目：中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金（2019）；国家自然科学基金（41790434）；福建农林大学杰出青年科研人才计划项目（xjq2017016）[Supported by Research Fund for Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes of the Chinese Academy of Sciences (2019); the National Natural Science Foundation of China (41790434); Outstanding Young Scientific Research Program of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq2017016)]。
作者简介：贺静雯（1996-），女，湖北天门人，硕士研究生，研究方向为自然资源管理，（E-mail）1121833004@qq.com。
***通信作者**：林勇明，博士，教授，硕士研究生导师，研究方向为区域资源优化，（E-mail）monkey1422@163.com。

dry-hot valley area. We selected the Jiangjiagou watershed as the research area, which is a typical watershed of dry and hot valleys. The sample zone was set in the watershed at an altitude of 1 400 - 3 000 m, and conducted a sample survey on the plant communities with eight elevation gradients in the sample zone. We firstly counted the species composition of the shrub layer and measured soil nutrients, soil water content and water holding capacity at different altitude gradients, and then, we analyzed the soil index and vegetation diversity index by principal component analysis and Pearson correlation analysis. The results showed that 80 species of 32 families, 77 genera, shrub layer plants were found in plots in the watershed. The composition of plant communities, soil organic carbon (SOC) content, total phosphorus (TP) content, soil water content and water holding capacity in the shrub layer were significantly affected by the elevation gradient (P<0.05). Among them, soil water content, water holding capacity, plant community richness index and diversity index all increased with altitude, and the SOC content in the high altitude area was significantly higher than that in the middle and low altitude areas (P<0.05). There were significant positive correlations between soil TN content and Pielou index; soil water content and Margalef index, Shannon-Wiener index and species number (P<0.05). It shows that besides the elevation gradient, soil nutrients and water content are also the key factors affecting the composition and diversity of shrub layer and grass layer in plant communities.

Keywords: Jiangjia Gully, community characteristics, species diversity, soil nutrient, soil moisture

物种多样性表征植被生长状况，是植物群落特征的基本属性（罗清虎等，2018），其不仅能反映群落中物种的丰富度、优势度、均匀度和变化程度，还能反映不同生境条件与群落的相互关系（刘海威等，2016；Hooper & Vitousek，1998）。海拔梯度是温度、湿度、降水和太阳辐射等多种环境因子的综合体现（刘海威等，2017），其可通过改变周围小气候环境要素来影响局部降水量，进而影响土壤水分指标，改变土壤理化性质和生物群落组成，在决定山地物种多样性垂直分布格局方面起着重要作用（刘娜等，2018；Li long et al., 2014）。近年来，前人对于海拔梯度与植物群落关系的研究有很多，如向琳等（2019）、张荣等（2019）和苏闯等（2018）分别对井冈山鹿角杜鹃群落灌木层多样性、周公山柳杉人工林植物多样性和贺兰山灌丛群落物种多样性随海拔梯度的变化进行过相关研究。但这些研究主要涉及亚热带湿润季风气候区和西北干旱区等，且由于其规律的复杂性，未能得出统一的结论，无法代表干热河谷特殊小气候区的植物群落分布格局（贺金生和陈伟烈，1997）。因此，探讨蒋家沟流域植物群落物种多样性的垂直分布格局对于丰富我国西南部的植被研究具有重要意义。

灌草层可改变林下微环境，影响森林更新，反映了森林物种组成和分布的变化情况，在维持森林生态稳定性、物种多样性和区域生态环境保护等方面都起着非常重要的作用（张荣等，2019；苏闯等，2018）。土壤作为植物环境的主要因子，为植物生长提供所需的水分和矿质元素，对植物群落的组成、分布和演替有着直接的影响（白永飞等，2000；Burke，2001）。了解蒋家沟流域不同海拔梯度植物群落灌草层多样性与土壤养分、水分间的关系，不仅能反应山地植物群落灌草层和土壤分布格局，还有助于预测大尺度下水平梯度上植物群落的变化趋势（Bagchi et al., 2014；Steinauer et al., 2015），是揭示山地植被与环境互馈机制、并对山地退化植被进行修复的重要依据。

蒋家沟流域属于滇东北高山峡谷区，流域内山高坡陡，山地海拔最高 3 269 m，最低 1 042 m，相对高差达 2 227 m。作为干热河谷典型流域，流域内灾害形式多样，滑坡、泥石流频发，植被破坏严重，生态系统极其脆弱（林勇明，2008）。由于地形的原因，该流域干湿季分明，垂直气候带明显，且受焚风效应的影响，该流域不同海拔区气候相差较大（温钦舒等，2014），降雨量差异明显，并在不同的地形条件对降水进行再分配，造成土壤养分积累与分布的差异性，从而影响植被分布格局。鉴于此，本文以蒋家沟流域不同海拔梯度植物群落灌

草层样方调查和土壤测定数据为基础，分析流域内灌草层物种多样性和土壤养分水分在不同海拔上的分布格局及二者之间的相关性，以期了解生态脆弱区不同海拔植物群落灌草层分布、结构对土壤因子的响应机制，从而为干热河谷典型流域的生态环境质量评价和山地植被的恢复与重建提供一定的数据支撑。

1　材料与方法

1.1 研究区域概况

蒋家沟位于云南省昆明市东川区境内，地理坐标为 103°06′~103°13′ E、26°13′~26°17′ N，流域面积 48.52 km^2。蒋家沟流域属于滇东北高山峡谷区，流域内山高坡陡，地势东高西低，相对高度大。沟道从东向西经东川区绿茂乡汇入小江（林勇明，2008）。受地形条件的制约，此流域气候干湿季分明，垂直气候带明显，5—10 月为该气候区的雨季，降雨量占全年总降雨量的 80%以上。流域内年降水量随海拔的增加而递增，年蒸发量却随海拔增加而递减。降水量和气温的垂直分异性，使植被和岩石风化程度在流域不同海拔区域存在显著差异（温钦舒等，2014）。同时，由于人类的长期干扰，流域内原生森林植被为人工林取代，乔木树种比较单一，高海拔区以云南松（*Pinus yunnanensis*）为主，低海拔区分布有新银合欢（*Leucaena leucocephala*）、台湾相思（*Acacia confusa*）、桉树（*Eucalyptus robusta*）及部分经济树种。

1.2 样地设置与调查

调查于 2018 年 7 月—8 月进行，在蒋家沟流域内设置海拔 1 400~3 000 m 样带，其中以 200 m 高程为一个海拔梯度，共设置 8 个梯度。每个海拔梯度内设置 6 个 5 m×5 m 灌木样方，每个灌木样方中间设置 1 个 1 m× 1 m 草本样方；共有 5 m×5 m 灌木样方 48 个，1 m× 1 m 草本样方 48 个。调查内容包括：

(1)群落特征：对每个灌木样方和草本样方的植被群落进行植物名称、数量、高度、覆盖度以及生长状况的调查。

(2)地理位置：用手持 GPS 确定各样方的经纬度、高程，利用地质罗盘确定坡度、坡向。

(3)土壤：在各梯度带均天气放晴 5 天后，于每个灌木样方内四角部位以及样方中心五点去除地表枯落物后，采集 0~20 cm 地表土壤混合后作为一个土样，放入自封袋；用环刀（规格 100 cm^3）采集原状土，同时取一部分土样移入铝盒，带回实验室进行测定，研究区 8 个海拔梯度共采集土样 48 个。土样分析指标包括土壤有机碳（soil organic carbon,SOC）、土壤全氮（soil total nitrogen,TN）、土壤全磷（soil total phosphorus,TP）、土壤含水量（soil water content,SWC）、土壤最大持水量（soil holding capacity,WHC）和田间持水量（field moisture capacity,FMC）。

1.3 样品处理及分析

采用环刀法（LY/T 1215-1999）测定土壤 WHC 和 FMC；将铝盒样品带回实验室烘干至恒重，冷却后称量土样干质量，计算 SWC；过 0.149 mm 筛后，SOC 采用重铬酸钾-外加热法（LY/T 1237-1999），TN 为凯氏定氮法（LY/T 1228-1999），TP 为碱熔-钼锑抗显色法测定（LY/T 1232-1999）。对样品进行 3 次重复测定，取其平均值为最终测定结果。

1.4 数据处理与分析

(1)由于蒋家沟流域乔木物种组成较为单一，且分布较少，本文在分析中仅考虑灌草层植物的重要值，具体计算公式如下（张金屯，2004）：

灌木和草本相对重要值（IV）=（相对盖度+相对多度+相对高度）/3。　　　　（1）

(2)本研究中，选取 Margalef 指数（R）、Simpson 指数（D）、Shannon-Wiener 指数（H）和 Pielou 指数（E）4 个指标对不同海拔梯度 48 个样地的植被群落 α 多样性特征进行分析。具体计算公式如下（罗清虎等，2018）：

Margalef 丰富度指数：　$R=(S-1)/\ln N$　　（2）

Simpson 多样性指数：　$D=1-\sum_{i=1}^{s}p_i^2$　　（3）

Shannon-Wiener 多样性指数：　$H=-\sum_{i=1}^{s}(p_i\ln p_i)$　　（4）

Pielou 均匀度指数：　$E=H/\ln S$　　（5）

式中：S 为样方内的总物种数；N 为样方内所有物种的个体数；P_i 为物种 i 的比例，即第 i 个物种的相对重要值。

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 进行数据处理。运用单因素（One-way ANOVA）方差分析进行差异性检验，以 $P<0.05$ 表示；Pearson 相关分析对植被特征指数和土壤理化性质之间的相关性进行分析。

2　结果与分析

2.1 不同海拔梯度灌草层重要值

调查结果表明，流域内灌草层主要物种有 32 科 77 属 80 种。其中，不同海拔梯度灌草层重要值最大的 5 个种（优势种）如表 1 所示。随着海拔梯度的下降，可以明显看出植物群落优势种的更替。牛至（*Origanum vulgare*）、银莲花（*Anemone cathayensis*）和川滇委陵菜（*Potentilla fallens*）等植物均喜温暖湿润气候，在高海拔植物群落中的竞争力较强，其重要值在 A~C 区域最高；马唐（*Digitaria sanguinalis*）在 A-C 和 E 区域重要值均为前五，说明其对中高海拔生态环境的适应性良好，是一种生态幅相当宽的广布中生植物。马桑（*Coriaria sinica*）、艾（*Artemisia argyi*）和豨莶（*Siegesbeckia orientalis*）主要分布于中低海拔 D~F 区域，其中，艾极易繁衍生长，对气候和土壤适应性强，因此，在 D-G 区域重要值均较高。新银合欢和披碱草（*Elymus dahuricus*）均具有很强的抗旱能力，对低海拔 G-H 区域干热河谷气候适应性较强，为所处群落的优势种群。

表 1　不同海拔梯度植物群落灌草层重要值最大的 5 个种

Table 1　Five species with the highest important value of shrub layer in different elevation gradient plant communities

种名 Species	海拔梯度 Elevation gradients							
	A	B	C	D	E	F	G	H
牛至 *Origanum vulgare*	18.641							
马唐 *Digitaria sanguinalis*	14.376	11.432	9.554		9.767			
小叶荩草 *Arthraxon lancifolius*	11.681			13.712				
金丝桃 *Hypericum monogynum*	9.654		8.632					
小舌紫菀 *Aster albescens*	8.541							
银莲花 *Anemone cathayensis*		19.830						
龙芽草 *Agrimonia pilosa*		12.480						
香附子 *Cyperus rotundus*		9.736						
猪殃殃 *Galium aparine*		8.692						
川滇委陵菜 *Potentilla fallens*			17.889					
青蒿 *Artemisia carvifolia*			11.210					
野草莓 *Fragaria vesca*			12.601					
马桑 *Coriaria sinica*				15.512				
火绒草 *Leontopodium leontopodioides*				12.877				

紫荆泽兰 *Eupatorium odoratum*	8.343	13.324			
艾 *Artemisia argyi*	8.169	16.514	11.146	8.184	
牛膝菊 *Galinsoga parviflora*		12.731	9.046		15.370
薄荷 *Mentha haplocalyx*		7.308			
豨莶 *Siegesbeckia orientalis*			15.353		
苦刺 *Sophora viciifolia*			13.938		
老鹳草 *Geranium orientali-tibeticum*			10.698		
新银合欢 *Leucaena leucocephala*				19.723	9.765
宽叶十万错 *Asystasia gangetica*				15.735	
扭黄茅 *Heteropogon contortus*				12.644	6.396
披碱草 *Elymus dahuricus*				9.404	19.974
龙爪茅 *Dactyloctenium aegyptium*					11.859

注：**A.** 海拔 2 800~3 000 m；**B.** 海拔 2 600~2 800 m；**C.** 海拔 2 400~2 600 m；**D.** 海拔 2 200~2 400 m；**E.** 海拔 2 000~2 200 m； **F.** 海拔 1 800~2 000 m； **G.** 海拔 1 600~1 800 m； **H.** 海拔 1 400~1 600 m。下同。

Note: **A.** Alt. 2 800-3 000 m; **B.** Alt. 2 600-2 800 m; **C.** Alt. 2 400-2 600 m; **D.** Alt. 2 200-2 400 m; **E.** Alt. 2 000-2 200 m; **F.** Alt. 1 800-2 000 m; **G.** Alt. 1 600-1 800 m; **H.** Alt. 1 400-1 600 m. The same below.

2.2 不同海拔梯度土壤理化性质

由表 2 可知，随着海拔的升高，土壤类型由黄壤逐渐过渡为山地红壤，最后变成山地棕壤。不同海拔梯度土壤 SOC 含量、TP 含量、土壤含水量和田间持水量均存在显著性差异（*P*＜0.05），说明土壤理化性质在垂直梯度上存在较大的空间异质性。其中，高海拔区域土壤 SOC 含量显著高于中低海拔（*P*＜0.05），这与上文中高海拔区域植物群落的物种多样性更高一致，说明植物-土壤系统之间存在着密切的联系。从整体上看，随着海拔梯度的下降土壤含水量和田间持水量逐渐减少，且高海拔与中低海拔区域之间均存在显著性差异（*P*＜0.05）。说明高海拔区域气候湿润，土壤质地好，更适合植物的生长。

表 2 不同海拔梯度土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils at different altitude gradients

海拔梯度 Altitude gradient	样本数量 Number of sample	土壤类型 Soil type	土壤有机碳 SOC (*w*/g·kg^{-1})	土壤全氮 TN (*w*/g·kg^{-1})	土壤全磷 TP (*w*/g·kg^{-1})	土壤含水量 SWC (*r*/%)	最大持水量 WHC (*r*/%)	田间持水量 FMC (*r*/%)
A	6	暗棕壤 Dark brown soil	42.178±3.576a	2.468±0.172ac	1.157±0.052abc	30.905±2.342a	49.333±1.514a	36.746±2.212a
B	6	棕壤 Brown soil	40.289±8.548a	2.550±0.654ac	0.917±0.040ab	29.855±2.281a	39.392±3.466ab	30.177±3.090ab
C	6	黄棕壤 Yellow brown soil	34.317±5.004ab	1.789±0.411b	0.845±0.011b	31.381±1.408a	41.757±2.339ab	34.848±1.431ab
D	6	红壤 Red soil	19.124±3.996bc	1.587±0.400abc	0.848±0.034b	16.779±4.177bd	33.265±8.284ab	20.886±5.516b
E	6	红壤 Red soil	19.321±5.557bc	1.806±0.530abc	1.395±0.317c	24.916±1.801ac	34.507±6.154ab	30.398±3.413b
F	6	红棕壤 Red brown soil	23.323±2.653abc	1.285±0.770ab	1.146±0.099abc	20.373±3.568bc	31.719±6.079b	23.507±3.846b
G	6	黄壤 Yellow soil	18.509±5.714c	1.370±0.361ab	1.262±0.015ac	14.671±1.823bd	35.548±5.079ab	21.891±2.327b
H	6	黄壤 Yellow soil	26.281±3.165bc	2.972±0.245c	1.025±0.040ab	10.125±1.557d	42.402±1.617ab	21.647±2.456b
ANOVA（*F* 值）	48		**3.508***	2.364	**3.426***	**8.821****	1.336	**3.045***

注：不同小写字母表示在 0.05 水平上不同海拔梯度各土壤养分含量的差异性。*表示在 0.05 水平上具有显著性；**表示在 0.01 水平上具有显著性。

Note: different lowercase letters indicate differences among soil nutrient contentx at different altitude gradients at

the 0.05 level; * means significant differences at the 0.05 level; ** means significant differences at the 0.01 level.

2.3 不同海拔梯度植物群落灌草层的物种多样性特征

由表 3 可知，研究区域植被群落的 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数均表现为随着海拔梯度的下降而逐渐减小，且 A-D 区域的植物群落 Margalef 指数与 E、G-H 区域存在显著性差异（$P<0.05$）；A-E 区域的植物群落 Shannon-Wiener 指数与 G-H 区域呈显著性差异（$P<0.05$），说明高海拔区域物种数目更为丰富，群落的复杂程度更高，而低海拔区域受自然条件影响，物种数目较少，群落结构简单。调查样地植被群落的 Pielou 指数在各海拔梯度内接近，且无显著性差异（$P<0.05$），说明流域内各样地植物的分布较为均匀。

表 3　不同海拔梯度植物群落的物种多样性特征

Table 3　Species diversity characteristics of plant communities at different altitude gradients

海拔梯度 Altitude gradient	样本数量（*N*） Number of sample	丰富度指数（*R*） Margalef index	多样性指数（*H*） Shannon-Wiener index	均匀度指数（*E*） Pielou index	优势度指数（*D*） Simpson index	物种（*S*） Species
A	6	5.640 ±0.363a	2.532 ±0.075a	0.896 ±0.004a	0.902 ±0.006a	17.000 ±1.528a
B	6	5.329 ±0.159a	2.439 ±0.075a	0.887 ±0.014a	0.889 ±0.011ab	15.670 ±0.667a
C	6	5.634 ±0.496a	2.495 ±0.096a	0.886 ±0.010a	0.890 ±0.005ab	17.330 ±2.082a
D	6	5.487 ±0.209a	2.487 ±0.008a	0.892 ±0.019a	0.897 ±0.004ab	16.330 ±0.882a
E	6	4.838 ±0.295b	2.399 ±0.107a	0.919 ±0.014a	0.895 ±0.014ab	13.670 ±1.202ac
F	6	4.656 ±0.579abc	2.237 ±0.207ab	0.881 ±0.018a	0.866 ±0.027abc	12.830 ±2.309abc
G	6	3.730 ±0.089c	2.030 ±0.037b	0.910 ±0.022a	0.842 ±0.012c	9.330 ±0.333b
H	6	3.992 ±0.231bc	2.080 ±0.102b	0.893 ±0.014a	0.854 ±0.021bc	10.160 ±0.882bc
ANOVA（*F* 值）	48	**4.752***	**3.557***	0.717	2.368	**4.595***

注：不同小写字母表示在 0.05 水平上物种多样性指数在不同海拔梯度的差异性。*表示在 0.05 水平上具有显著性。

Note: different lowercase letters indicate differences in species diversity indices at different altitude gradients at 0.05 level; *means significant differences at the 0.05 level.

2.4 植物群落特征指数与土壤理化性质的关系

对海拔、植被特征指数和土壤理化性质等 11 个指标进行主成分分析， 计算结果（表 4）表明，前 3 个主成分提供的信息量分别为 44.86%、22.74%、15.16%。第一主成分中丰富度指数、多样性指数、优势度指数和物种数目等指标特征向量绝对值较大，主要表征植物群落组成与海拔相关性较强；第二主成分中土壤含水量、最大持水量、田间持水量和土壤有机碳等环境因子特征向量绝对值较大，主要反映了土壤水肥的变化；第三主成分中特征向量绝对值较大的环境因子有土壤全磷和均匀度指数。

根据主成分分析结果，对植被特征指数和土壤理化性质进行皮尔逊相关性分析。从表 5 可知，SOC 与 TN 含量、土壤含水量、最大持水量和田间持水量均存在显著相关性，这说明土壤环境因子之间存在一定的协同作用。土壤 TN 含量与最大持水量，土壤 TP 含量与均匀度指数 Peilou，土壤含水量、田间持水量与物种数目、丰富度指数 Margalef 均存在较大的正相关性，说明土壤水分条件是影响植物群落灌草层多样性的关键因子。

表 4 主成分因子负荷量、特征根与贡献率

Table 4 Loading factor, eigenvalue and contribution ratio of principle components

因子 Factor	成分 Component I	II	III

土壤有机碳 Soil organic carbon	0.179	0.809	-0.296
土壤全氮 Soil total nitrogen	-0.482	0.582	-0.034
土壤全磷 Soil total phosphorus	-0.107	0.109	0.842
土壤含水量 Soil water content	0.503	0.699	-0.126
最大持水量 Water holding capacity	0.073	0.874	0.186
田间持水量 Field moisture capacity	0.300	0.888	0.073
丰富度指数 Margalef index	0.953	0.199	-0.146
均匀度指数 Pielow index	0.156	-0.152	0.845
多样性指数 Shannon-Wiener index	0.974	0.141	0.103
优势度指数 Simpson index	0.899	0.104	0.289
物种 Species	0.950	0.201	-0.152
特征根 Eigenvalue	4.935	2.502	1.667
贡献率 Contribution ratio （*r*/%）	44.863	22.741	15.156
累计贡献率 Cumulative contribution ratio（*r*/%）	44.863	67.604	82.761

表 5 植被特征指数与土壤理化性质皮尔逊相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis of vegetation characteristic indexes and soil physical and chemical properties

参数 parameter	SOC	TN	TP	SWC	WHC	FMC	*R*	*E*	*H*	*D*	*S*
SOC	1										
TN	**0.441***	1									
TP	-0.236	-0.025	1								
SWC	**0.652****	-0.044	-0.010	1							
WHC	**0.557****	**0.440***	0.210	**0.537****	1						
FMC	**0.716****	0.245	0.212	**0.844****	**0.822****	1					
R	0.349	-0.287	-0.162	**0.587****	0.245	**0.438***	1				
E	-0.212	-0.112	**0.452***	-0.165	-0.006	-0.053	-0.055	1			
H	0.268	-0.304	-0.026	**0.526****	0.217	0.399	**0.954****	0.233	1		
D	0.203	-0.213	0.068	0.395	0.191	0.334	**0.835****	**0.438***	**0.952****	1	
S	0.353	-0.288	-0.163	**0.587****	0.248	**0.440***	**1.000****	-0.062	**0.949****	**0.827****	1

注：**SOC.** 土壤有机碳；**TN.** 土壤全氮；**TP.** 土壤全磷；**SWC.** 土壤含水量；**WHC.** 最大持水量；**FMC.** 田间持水量；***R.*** 丰富度指数；***E.*** 均匀度指数；***H.*** 多样性指数；***D.*** 优势度指数；***S.*** 物种数目。*表示在 0.05 水平上具有显著性；**表示在 0.01 水平上具有显著性。

Note: **SOC.** Soil organic carbon; **TN.** Soil total nitrogen; **TP.** Soil total phosphorus; **SWC.** Soil water content; **WHC.** Water holding capacity; **FMC.** Field moisture capacity; ***R.*** Margalef index; ***E.*** Pielou index; ***H.*** Shannon-Wiener index; ***D.*** Simpson index; ***S.*** Species. *: significant at the 0.05 level; **: significant at the 0.01 level.

3 讨 论

张广帅等（2014）对干热河谷山地土壤与植被群落研究发现，海拔和土壤理化性质对物种分布及其多样性有很大影响。本研究中，高海拔区土壤以山地棕壤为主，SOC 含量显著高于中低海拔区域（$P<0.05$）。土壤表层 SOC 含量主要受到植物凋落物和死亡根系分解等

因素影响，植物-凋落物-土壤系统的循环是增加 SOC 含量的重要途径（Percival et al., 2000；赵景学等，2011）。高海拔区域气候湿润，植物群落多样性高，凋落物补充进入系统多使得 SOC 含量最高。且 SOC 含量的高低会影响到土壤中其他全量养分含量，使其趋向一致（李以康等，2013）。本研究中，不同海拔梯度土壤 TN 含量与 SOC 含量分布格局一致，主要表现为随着海拔的下降而逐渐降低。此外，随着海拔的下降，流域内降雨量逐渐减少（林勇明，2008），土壤类型由山地红壤逐渐过渡为山地黄壤，植被覆盖率也随之减少，部分裸露土地的氮素随着降水淋溶至下层土壤或者随水流失，使得土壤 TN 含量降低，但是在 1 400~1 600 m 处出现分布较广的新银合欢，其具有的固氮能力造成土壤 TN 含量在 H 区显著升高。土壤 TP 含量在不同海拔梯度分布格局与其他养分不同，表现为 E 区域显著高于 B-D 区域（$P < 0.05$），这可能是因为高海拔区域降雨量更为丰富，土壤 TP 亦被冲刷淋溶，而中低海拔区域降雨量较少，坡度平缓，易于养分的汇集积累，使得中低海拔区域土壤 TP 含量更高。此外，土壤含水量和田间持水量也是影响植被分布格局的重要土壤因子之一（董磊等，2014）。该研究中，土壤含水量和田间持水量随着海拔梯度的下降而逐渐减少，植物群落的多样性也逐渐降低，这与该流域内三个垂直气候带一一对应，张广帅等（2014）也有类似的研究结果。

贺金生等（1997）对国内外文献整理发现，物种多样性沿海拔梯度的分布格局大致存在 5 种形式，包括随着海拔的增加先降低后升高、先升高后降低、单调升高、单调降低和无明显规律。在本研究中，调查样地灌草层丰富度指数和多样性指数的海拔梯度分布格局均表现为随着海拔的增加，物种多样性单调升高。这可能是因为低海拔区域为亚热带干热河谷气候，受焚风效应影响，温度升高湿度降低，植物种类十分有限，物种多样性较低；过渡到中海拔亚热带、暖温带半湿润气候后，降水量的增加使得物种多样性逐渐增加；高海拔为温带湿润山岭气候，高山植物大大增加，物种多样性远高于前两个气候区（林勇明，2008），这与上文中土壤养分水分在不同海拔的分布格局一致。此外，调查样地灌草层优势度指数在中高海拔区域高于低海拔区域，说明低海拔区域优势物种在样方中的分布较为集中，这可能是干热河谷气候区土壤环境干旱、贫瘠，植物群落类型较少造成的。

该研究中，植物群落组成和土壤水分养分等土壤理化因子与海拔均有较强的相关性，前人也有类似的研究结果（Dinnage et al., 2012；陈云等，2017）。但皮尔逊相关性分析表明，调查区土壤养分仅 TP 对均匀度指数产生显著影响。这可能是因为研究区内土壤侵蚀使得土壤养分库大量流失，引起土壤养分变异程度加大，弱化了其对植物群落的表征作用，使得植物群落多样性指数与土壤养分的相关性较小，证实了王兴等（2014）的研究结论。土壤持水能力是土壤水文调节功能强弱的指标，田间持水量是大多数植物可利用的土壤水上限（单贵莲等，2012；Shwetha & Varija，2015）。该研究中，土壤含水量、田间持水量与植物群落多样性存在显著正相关，这与蒋家沟流域地处干热河谷气候区，受焚风效应的影响有关，流域内土壤水分成为植被空间分布差异的重要影响因子，受水分条件的制约，使得群落物种多样性发生变化，左小安等（2007）对科尔沁沙质草地群落的研究也有类似的结果。

综上所述，研究区内灌草层植物群落组成及土壤养分、水分等理化因子均受海拔梯度的显著影响，具体表现为随着海拔梯度的升高，大气温度降低，土壤含水量和田间持水量升高，土壤类型由山地黄壤、红壤逐渐过渡为山地棕壤，植物群落的丰富度指数和多样性指数随之升高，高海拔区土壤有机碳、全氮含量也显著高于中海拔区域；相关性分析表明，土壤有机碳、全氮含量与土壤含水量、田间持水量等环境因子之间具有一定的协同作用；除海拔梯度外，土壤含水量和田间持水量也是影响植物群落灌草层多样性的限制性因素。

参考文献：

BAI YF, LI LH, WANG QB, et al., 2000. Changes in plant species diversity and productivity along gradients of precipitation and elevation in the Xilin River basin, Inner Mongolia [J]. Chin

J Plant Ecol, 24 (6): 667-673. [白永飞，李凌浩，王其兵，等, 2000. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究 [J]. 植物生态学报, 24 (6): 667-673.]

CHEN Y, FENG JW, NIU S, et al., 2017. Numerical classification, ordination, and species diversity of bryophytes along elevation gradients in Xiaoqinling [J]. Acta Ecol Sin, 37 (8): 2653-2664. [陈云，冯佳伟，牛帅，等, 2017. 小秦岭自然保护区苔藓植物群落数量分类、排序及多样性垂直格局 [J]. 生态学报, 37 (8): 2653-2664.]

DONG L, XU LG, XU JX, et al., 2014. Effects of soil environmental factors on vegetation distribution in shoaly wetlands typical to Poyang Lake [J]. Acta Pedol Sin, 51 (3): 618-626. [董磊，徐力刚，许加星，等，2014. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤环境因子对植被分布影响研究 [J]. 土壤学报, 51 (3): 618-626.]

HE JS, CHEN WL, 1997. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities [J]. Acta Ecol Sin, 17(1): 93-101. [贺金生，陈伟烈, 1997. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 17(1): 93-101.]

LI YK, ZHANG FW, LIN L, et al., 2013. Differentiation characteristics of soil nutrients in temperate steppe under different vegetation types [J]. Chin J Ecol, 32 (7): 1710-1716. [李以康，张法伟，林丽，等，2013. 不同植被被覆下温性草原土壤养分分异特征 [J]. 生态学杂志, 32 (7): 1710-1716.]

LIN YM, 2008. Study on interactions of landscape change and soil erosion in the typical watershed of Jinsha River—A case study of Jiangjia Gully in Yunan Province [D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water resource, Institute of Mountain Hazards and Environment. [林勇明, 2008. 金沙江小流域景观格局变化与土壤侵蚀的耦合作用——以云南蒋家沟为例 [D]. 成都：中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所.]

LIU HW, ZHANG SK, JIAO F, 2016. Relationships between community characteristics and soil nutrients and moisture in abandoned hill country grassland [J]. Acta Pratacul Sin, 25 (10): 31-39. [刘海威，张少康，焦峰，2016. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应 [J]. 草业学报, 25(10): 31-39.]

LIU HW, ZHANG SK, JIAO F, 2017. Effects of nitrogen and phosphorus addition on community and soil stoichiometric characteristics of abandoned farmlands of different vegetation restoration years [J]. J Soil Water Conserv, 31 (2): 333-338. [刘海威，张少康，焦峰, 2017. 氮磷添加对不同退耕年限草本植被群落及土壤化学计量特征的影响 [J]. 水土保持学报，31 (2): 333-338.]

LIU N, BAI KY, YANG YH, et al., 2018. Effect of grazing on vegetation and soil nutrients of a desert steppe in Inner Mongolia [J]. Pratacul Sci, 35 (6): 1323-1331. [刘娜，白可喻，杨云卉，等，2018. 放牧对内蒙古荒漠草原草地植被及土壤养分的影响 [J]. 草业科学，35 (6): 1323-1331.]

LUO QH, SUN F, WU JZ, et al., 2018. Characterizing the vegetation community in the provenance slope with high-frequency debris flow [J]. Chin J Appl Environ Biol, 24 (4): 681-688. [罗清虎，孙凡，吴建召，等, 2018. 泥石流频发流域物源区坡面植被群落特征 [J]. 应用与环境生物学报, 24 (4): 681-688.]

SHAN GL, CHU XH, TIAN QS, et al., 2012. Research on the dynamic changes of soil properties of typical steppe in the restoring process [J]. Acta Pratacul Sin, 21(4): 1-9. [单贵莲，初晓辉，田青松，等，2012. 典型草原恢复演替过程中土壤性状动态变化研究 [J]. 草业学报，21(4): 1-9.]

SU C, ZHANG XY, MA WH, et al., 2018. Altitudinal pattern and environmental interpretation of

species diversity of scrub community in the Helan Mountains [J]. J Mount Sci, 36 (5): 699-708. [苏闯，张芯毓，马文红，等，2018. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释[J]. 山地学报, 36 (5): 699-708.]

WANG X, SONG NP, YANG XG, et al., 2014. Redundancy analysis of soil and vegetation of recovered grassland on abandoned land in the desert steppe [J]. Acta Pratacul Sin, 23 (2): 90-97. [王兴，宋乃平，杨新国，等, 2014. 荒漠草原弃耕恢复草地土壤与植被的RDA分析 [J]. 草业学报, 23 (2): 90-97.]

WEN QS, WANG DJ, WU SZ, et al., 2014. Preliminary investigation on zonal control pattern of debris flow in Shengousmall watershed in Dongchuan, Yunnan province [J]. Chin J Geo Hazard Control, 25 (3): 14-19. [温钦舒，王道杰，武绍周，等, 2014. 云南东川深沟泥石流分区治理模式初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 25 (3): 14-19.]

XIANG L, CHEN FQ, GUAN SP, et al., 2019. Functional diversity and spatial variation of shrubs in *Rhododendron latoucheae* communities distributed along an altitude gradient in Mt. Jinggang [J]. Acta Ecol Sin, 39 (21): 8144-8155. [向琳，陈芳清，官守鹏，等, 2019. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层功能多样性及其随海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 39 (21): 8144-8155.]

ZHANG GS, DENG HJ, YU W, et al., 2014. Vertical gradient analysis of soil environmental factors and vegetation community in mountain areas of frequent debris flow: a case study in the Xiaojiang Watershed, Yunnan[J]. Chin J Appl Environ Biol, 20 (4): 646-654. [张广帅，邓浩俊，俞伟，等，2014. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例 [J]. 应用与环境生物学报, 20 (4): 646-654.]

ZHANG JT, 2004. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press. [张金屯, 2004. 数量生态学 [M]. 北京：科学出版社.]

ZHANG R, LI TT, JIN S, et al., 2019. Effects of different altitudes on plant diversity and soil nutrients of *Cryptomeria fortunei* plantation in Zhougong Mountain [J/OL]. J Centr S Univ Forest & Technol: 1-9[2019-11-25]. [张荣，李婷婷，金锁，等, 2019. 不同海拔高度对周公山柳杉人工林植物多样性及土壤养分的影响 [J/OL]. 中南林业科技大学学报: 1-9[2019-11-25.]

ZHAO JX, CHEN XP, QU GP, et al., 2011. Relationships between aboveground biomass and soil factors in alpine grasslands in North Tibet [J]. Chin J Gras, 33 (1): 59-64. [赵景学，陈晓鹏，曲广鹏，等，2011. 藏北高寒植被地上生物量与土壤环境因子的关系 [J]. 中国草地学报，33 (1): 59-64.]

ZHAO SQ, FANG JY, ZONG ZJ, et al., 2004. Composition, structure and species diversity of plant communities along an altitudinal gradient on the northern slope of Mt. Changbai, Northeast China [J]. Biodivers Sci, 12 (1): 164-173. [赵淑清，方精云，宗占江，等, 2004. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布 [J]. 生物多样性, 12 (1): 164-173.]

ZUO XA, ZHAO XY, ZHAO HL, et al., 2007. Changes of Species Diversity and Productivity in Relation to Soil Properties in Sandy Grassland in Horqin Sand Land [J]. Environ Sci, 28 (5): 945-951. [左小安，赵学勇，赵哈林，等, 2007. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系 [J]. 环境科学, 28 (5): 945-951.]

BAGCHI R, GALLERY RE, GRIPENBERG S, et al., 2014. Pathogens and insect herbivores drive rainforest plant diversity and composition (Article)[J]. Nature, 506(7486): 85-88.

BURKE A, 2001. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia[J]. J Veget Sci, 12(1): 53-60.

DINNAGE R, CADOTTE MW, HADDAD NM, et al., 2012. Diversity of plant evolutionary

lineages promotes arthropod diversity (Article) [J]. Ecology Letters, 15(11): 1308-1317.
FRANSEN B, KROON DH, BERENDSE F, 2001. Soil nutrient heterogeneity alters competition between two perennial grass species[J]. Ecology, 82(99): 2534-2546.
HOOPER DU, Vitousek PM, 1998. Effects of plant composition and diversity on nutrient cycling[J]. Ecol Monogr, 68: 121-149.
LI L, TILMAN D, LAMBERS H, et al., 2014. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture (Review) [J]. New Phytol, 203(1): 63-69.
PERCIVAL HJ, PARFITT RL, SCOTT NA, 2000. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: is clay content important? [J]. Soil Sci Soc Am J, 64(5): 1623-1630.
SHWETHA P, VARIJA K, 2015. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils[J]. Aquat Proced, 4: 1142-1149.
STEINAUER K, TILMAN D, WRAGG PD, et al., 2015. Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment[J]. Ecology, 96(1): 99-112.